

# **Evaluación Económica de las Alternativas de Pretratamiento para la producción de Etanol a partir de bagazo**

## **Economic Evaluation of Pretreatment alternatives for Ethanol production from Sugar Cane Bagasse**

**Yaillet Albernas<sup>1</sup>; Leyanis Mesa<sup>1</sup>; Erenio González<sup>1</sup>; Meilyn González<sup>1</sup>; M Díaz<sup>2</sup>; Eulogio Castro<sup>2</sup>**

**Afiliación:**

**<sup>1</sup> Centro de Análisis de Procesos (CAP). Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.**

**<sup>2</sup> Departamento de Química, Ingeniería de Materiales y Medio Ambiente, Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén. España.**

**e-mail: [yailletac@uclv.edu.cu](mailto:yailletac@uclv.edu.cu)**

### **Resumen**

El bagazo de la caña de azúcar es un residuo lignocelulósico de la industria de la caña de azúcar que se propone como materia prima para la producción del etanol. El presente trabajo presenta la evaluación económica de alternativas de pretratamiento empleando esta biomasa, basado en la aproximación de dos etapas. La primera etapa de pretratamiento consiste en la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico diluido, donde la concentración de ácido, el tiempo de la etapa y la relación sólido líquido fueron seleccionados como variables independientes. Los experimentos de pretratamiento fueron desarrollados en un reactor a escala piloto mediante un diseño de experimento 2<sup>k</sup>. La segunda etapa desarrollada con los sólidos emitidos en la primera etapa es un pretratamiento organosolv, en el cual la relación etanol – agua como solvente, el tiempo del proceso y la concentración de NaOH (empleado como catalizador) fueron tomados como variables independientes para el diseño de experimento saturado fraccional Plackett-Burmann. Los sólidos pretratados se someten a una hidrólisis enzimática (a escala de laboratorio) para evaluar el rendimiento del pretratamiento. Los resultados de la hidrólisis enzimática fueron empleados para evaluar los costos de inversión y de producción mediante la aplicación de los métodos de estimación.

Se presentan las posibilidades de factibilidad y el diseño del esquema tecnológico basado en el pretratamiento y la hidrólisis enzimática.

**Palabras Claves:** Etanol, Bagazo, Pretratamiento

**Abstract**

Sugar cane bagasse is a lignocellulosic residue in the cane sugar industry whose use as raw material for ethanol production has been proposed. This work presents an economic evaluation of the pre-treatment alternatives using this biomass, based on a two-step approach. The first pretreatment step consisted in dilute sulphuric acid hydrolysis, where the acid concentration, the process time and the solid to liquid ratio were selected as independent variables. The pretreatment experiments were performed in a pilot scale reactor following a  $2^k$  experimental design. The second step, performed on solids issued from the first stage, was an organosolv pre-treatment, in which the ratio ethanol-water as solvent, the process time and the NaOH concentration (used as a catalyst) were chosen as independent variables for a Plackett-Burmann saturated fractional experimental design. The pretreated solids were further submitted to enzymatic hydrolysis (lab scale) to evaluate pre-treatment performance. Enzymatic hydrolysis results were used to evaluate invests and production costs by applying economic estimation methods. The possibilities of feasibility and the technological scheme layout based on the pretreatment and enzymatic hydrolysis are presented

**Key words:** Ethanol, Bagasse, Pretreatment

## **1. Introducción.**

Los elevados consumos energéticos han originado una inevitable disminución de las reservas de combustibles fósiles y ha provocado una atmósfera con elevados niveles de contaminación, es por ello que el etanol ocupa un importante lugar dentro de los combustibles obtenidos a partir de fuentes renovables.

Uno de los factores que limitan en el empleo de la biomasa como fuente de combustible y productos químicos es la seguridad de las cosechas y el transporte hacia los lugares de destino. La logística para la transportación de la caña de azúcar y el bagazo hasta las fábricas de azúcar abre una extraordinaria perspectiva para incrementar la capacidad instalada de la producción de etanol empleando el bagazo residual de la industria azucarera [1].

Uno de los principales retos en la comercialización del etanol obtenido en el proceso a partir de materiales lignocelulósicos es lograr un pretratamiento económicamente rentable [6].

Dentro de las alternativas de pretratamiento es evaluado el proceso organosolv. Este proceso ha sido investigado para la producción de pulpa y papel [2], pero han demostrado la calidad de varias fracciones de otros productos generados en este proceso como la fracción de lignina extraída durante el pretratamiento, incluyendo el potencial demostrado para la obtención de otros coproductos, junto con la conservación en el sólido de la fracción glucano inhibiendo en alguna medida la generación de compuestos durante la fermentación [4]. La obtención de niveles aceptables de azúcares fermentables y coproductos a partir de bagazo es posible con el empleo del pretratamiento organosolv con etanol aplicando una o dos etapas, por otra parte usando compuestos complementarios en la etapa de hidrólisis enzimática, la eficiencia de esta etapa puede incrementar en el proceso global.

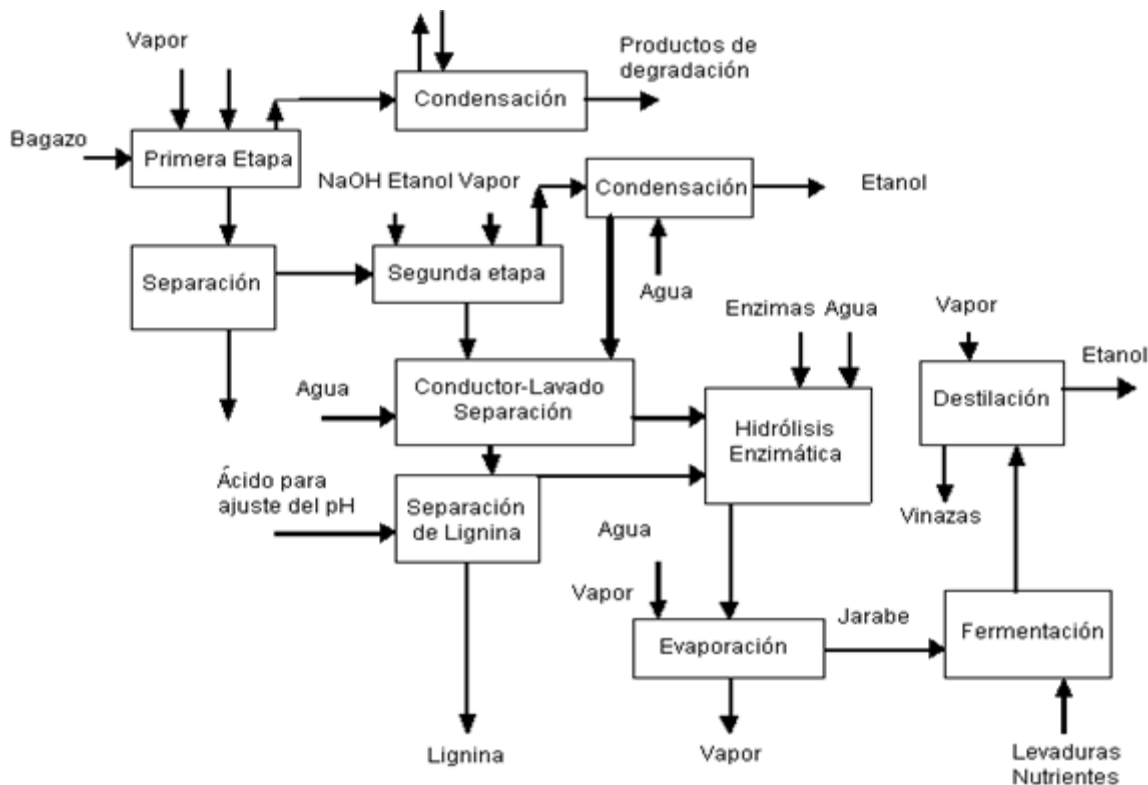
Los costos de la producción de etanol están muy relacionados con los costos, el volumen y la composición de la materia prima. El sistema de producción de bioetanol que muestra las mejores oportunidades de éxito será el que considere los más bajos costos de materias primas y permita la producción de derivados.

### **2. Materiales y métodos.**

#### **2.1. Condiciones del estudio.**

En el presente estudio, la disponibilidad de bagazo

considerada es de 60 000 ton por año, en una región geográfica previamente definida. La evaluación del sistema propuesto de pretratamiento empleado en la producción de etanol con bagazo de caña de azúcar como materia prima, incluye varias alternativas en las condiciones de pretratamiento que incluye la combinación de dos etapas de pretratamiento, la primera (con ácido sulfúrico) hacia la separación de los azúcares de cinco átomos de carbono y la segunda (Organosolv con hidróxido de Sodio) directamente hacia la separación de lignina. El diseño estudiado incluye la evaluación en la primera etapa de pretratamiento la posibilidad de incluir o no el uso de etanol, así como la alternativa de emplear solo la etapa ácida. El esquema de la tecnología se presenta en la figura 1, e incluye las dos etapas de pretratamiento, la hidrólisis enzimática, la concentración del jarabe obtenido y la fermentación y destilación tradicional.



**Figura 1.** Esquema tecnológico de la producción de etanol a partir de bagazo.

Las etapas del proceso incluyen el siguiente equipamiento:

- Sistema de manipulación del bagazo
- Bomba dosificadora de ácido sulfúrico
- Digestores (reactores) para la reacción ácida de separación de la Xilosa, con inyección de vapor.
- Sistema de condensación y recuperación de componentes, con interés económico en la primera etapa (al menos el etanol).
- Conductor de los restos lignocelulósicos de la primera etapa y prensa tipo tornillo sinfín para la separación y conducción hasta la segunda etapa.
- Bomba dosificadora de hidróxido de sodio.
- Bomba impulsora de agua para el ajuste de la relación sólido líquido y lavado de la pulpa lignocelulósica.
- Bomba impulsora de agua fría.
- Bomba impulsora para la recirculación de corrientes acuosas en el proceso.
- Digestores (reactores) con inyección de vapor para la reacción empleando NaOH para la separación de lignina.
- Sistema de condensación y recuperación de componentes, con interés económico en la segunda etapa (al menos el etanol).

·Conductor de los restos lignocelulósicos de la segunda etapa y prensa tipo tornillo sinfín para la separación y conducción hasta la hidrólisis enzimática.

- Tanque de almacenamiento para el agua de lavado de la segunda etapa.
- Equipamiento para la hidrólisis enzimática (reactor)
- Sistema de manipulación del sólido residual de la hidrólisis enzimática.
- Tanque de almacenamiento para la solución de glucosa para la sacarificación.
- Equipamiento para la evaporación y concentración de la solución de glucosa.
- Sistema de condensación para la etapa de concentración del jarabe.
- Etapa de fermentación (fermentadores).
- Etapa de destilación (Columnas de destilación).

## 2.2. Selección de equipamiento.

La selección del equipamiento se realiza de acuerdo con las definiciones hechas previamente del equipamiento considerando las particularidades de cada etapa y la experiencia industrial de los diferentes equipos instalados en condiciones industriales similares a las empleadas en esta tecnología. Sistema de alimentación y manipulación de bagazo:

Se selecciona el sistema tradicional de la manipulación del bagazo mediante una estera de goma o metal, similar a los empleados para la transportación de pequeños pedazos de madera.

Digestores (reactores) para la reacción ácida de separación de la xilosa con inyección de vapor: Se selecciona un reactor vertical con inyección de vapor, el mismo se carga por la parte superior y se descarga por la inferior, con un sistema de extracción de gases y vapor en el tope para el sistema de condensado, acoplado al reactor.

Sistema de condensación y recuperación de componentes de interés económico en los vapores de la primera etapa (etanol y/o pentosas): Para ambas etapas de pretratamiento se selecciona sistema de condensación construidos de tubos y coraza de acero inoxidable empleando agua como fluido frío.

Conducción de los residuos lignocelulósicos de la primera etapa: Se selecciona un sistema tradicional de manipulación de la pulpa de bagazo con rastrillo y pequeñas tablas y bandas de metal.

Se selecciona tornillo prensa horizontal para la separación y conducción de la biomasa pretratada hasta la segunda etapa de pretratamiento e hidrólisis enzimática. Se seleccionan tornillos sinfín para el lavado del material pretratado después de las etapas de pretratamiento.

Digestores (reactores) para el pretratamiento organosolv con inyección de vapor. Se selecciona un tipo de reactor cilíndrico horizontal rotatorio con bajas revoluciones sobre el eje central. Este es del mismo tipo que el empleado para las experiencias realizadas a nivel de planta piloto.

Sistema de condensación y recuperación de componentes de interés económico en los vapores de la segunda etapa (etanol).

Bomba centrífuga dosificadora de ácido sulfúrico, se selecciona una centrífuga de acero inoxidable. Centrífuga de acero plástico o ferro silicona.

Se selecciona una bomba centrífuga de acero al carbono para la alimentación de agua a la entrada del hidromódulo acoplada al sistema de lavado de la biomasa pretratada. Este mismo tipo de bomba es seleccionado para el agua de enfriamiento.

Se selecciona un tanque de acero al carbono para el almacenamiento del agua de lavado de la segunda etapa. La hidrólisis enzimática se realizará en un reactor encaquetado estándar con agitación.

Sistema de manipulación de los residuos sólidos de

la hidrólisis enzimática, para ello se selecciona un sistema tradicional de manipulación de la pulpa con rastrillo y pequeñas tablas y bandas de metal.

Tanque de almacenamiento del jarabe azucarado, se selecciona un tanque con la capacidad necesaria para mantener la producción de forma continua.

Para el equipamiento de evaporación y concentración del jarabe, se selecciona un equipo de cristal con efectos de doble intercambio.

Para el sistema de condensación y recuperación de los vapores de jarabe en la etapa de concentración se selecciona un equipo de condensación tradicional al vacío empleado en la producción azucarera.

Se seleccionan los equipos tradicionales empleados en la obtención de alcohol convencional a partir de mieles para la etapa de fermentación alcohólica al igual que en la etapa de destilación.

### **2.3. Determinación del valor de la inversión.**

La sistemática evaluación técnico económica de la tecnología propuesta es ha sido un paso fundamental en la estrategia de investigación y desarrollo de la tecnología para la obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos [3] acompañado de un estudio de vigilancia tecnológica realizado con el mismo fin.

El presente estudio incluye 60 000 tons de bagazo disponible y considerando 300 días de producción se requieren capacidades para producir 200 tons por día, de acuerdo con los resultados de laboratorio, se podrán obtener diferentes rendimientos de etanol en cada alternativa tecnológica.

Para el cálculo del costo del equipamiento se emplean valores reales de equipos instalados industrialmente, actualizando los valores a través de los índices anuales de costo y considerando los equipos de la literatura técnica científica [5]. Para el sistema de manipulación del bagazo y de los residuos se tomaron referencias de valores de inversión de instalaciones de pulpeo de bagazo para la producción de tableros actualizando estos de acuerdo a los cambios de capacidad mediante la aplicación de la regla de la punto seis.

Las posibilidades tecnológicas de las diferentes alternativas de pretratamiento en dos etapas fueron evaluadas empleando un diseño de experimentos que analiza el efecto de la combinación de variables en la primera y segunda etapa en los siguientes rangos de operación:

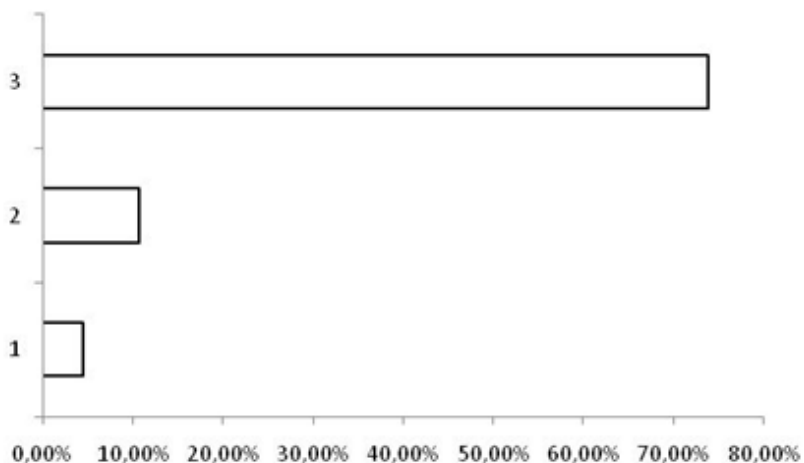
·X1: Tiempo en la primera etapa: 40 minutos.

- X2: Porcentaje de etanol en la primera etapa:  
0 - 45%
- X3: Relación líquido sólido en la primera etapa:  
5/1- 7/1
- X5: Tiempo en la segunda etapa:  
60 - 90 minutos.
- X6: Porcentaje de etanol en la segunda etapa:  
10 - 45%
- X7: Porcentaje de NaOH en la segunda etapa:  
1,5 - 3%

Las diferentes combinaciones tecnológicas de pretratamiento fueron experimentadas a escala piloto. El equipamiento empleado tiene un diseño igual que los equipos industriales destinados a operaciones similares en la industria de los derivados de la caña de azúcar.

La evaluación experimental se hizo mediante un diseño de Plackett-Burmann. Los resultados son referidos como porcentajes de los mejores valores resultados y ellos fueron considerados como unitarios para todos los parámetros de respuesta, la tabla I muestra los resultados.

peso, aunque es la alternativa que requiere elevados costos fijos de inversión. La composición del costo de fabricación de la alternativa 8 es como sigue:



1: Costos Externos; 2: Cargos fijos y 3: Costos Directos.

**Figura 2.** Composición del costo de fabricación de la alternativa 8.

**Tabla I.** Resultados de la evaluación económica. Estimación del costo de producción por hectolitro (C/hL), Costo de producción por peso (C/P); Costo fijo de inversión (CFI).

N	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	C/hL	C/P	CFI
1	+	+	+	-	+	-	-	1.36	1.32	0.92
2	+	+	-	+	-	-	+	1.75	1.73	0.97
3	+	-	+	-	-	+	+	1.74	1.68	0.89
4	-	+	-	-	+	+	+	1.38	1.32	0.78
5	+	-	-	+	+	+	-	1.94	1.92	0.97
6	-	-	+	+	+	-	+	1.85	1.80	0.81
7	-	+	+	+	-	+	-	1.32	1.29	0.90
8	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00

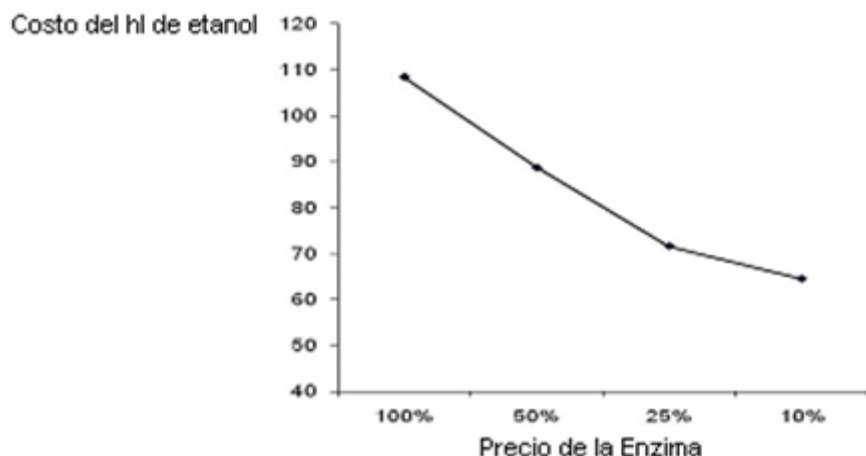
Los resultados mostrados en la Tabla I demuestran que el mejor resultado en este análisis es la alternativa número 8, teniendo en cuenta los resultados del costo de producción de etanol por

La figura 2 muestra los resultados de los indicadores económicos para la evaluación de la alternativa 8. En este estudio fue hecho un análisis de sensibilidad para el costo directo y la inversión fija. Los costos de las materias primas dependen esencialmente de dos componentes: el costo de las enzimas y el costo del bagazo (48.88% y 12.22%, respectivamente). El resto de los componentes de las materias primas ejercen igual

efecto en el costo de los materiales y el vapor empleado en la producción de etanol tiene un 7.78 % de incidencia en los costos directos.

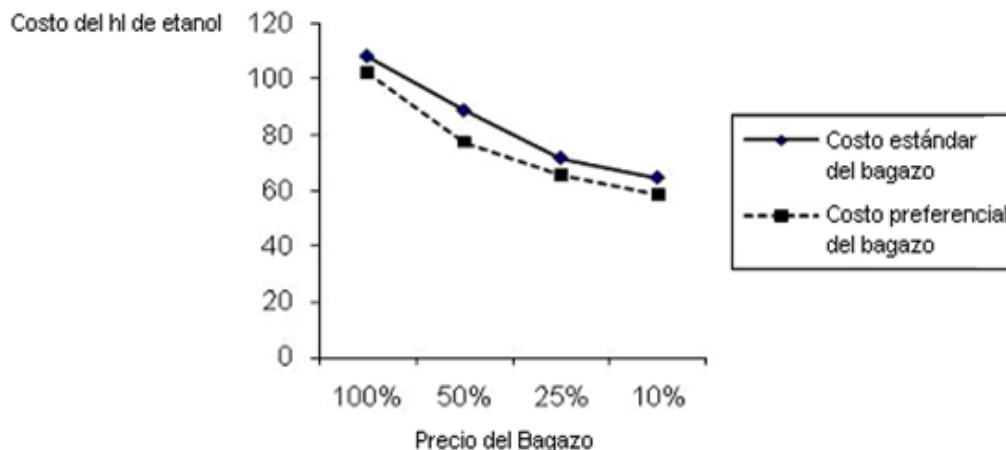
**2.4. Resultados de análisis de sensibilidad ante cambios en los costos de las materias primas.**

La figura 3 muestra un estudio de sensibilidad del costo de las enzimas, este análisis concluye que el costo de producción del etanol a partir de materiales lignocelulósicos es altamente sensible con respecto al precio de la enzima y minimizando el costo de producción de las enzimas se puede lograr disminuir cerca del 40 % del costo de producción del etanol.



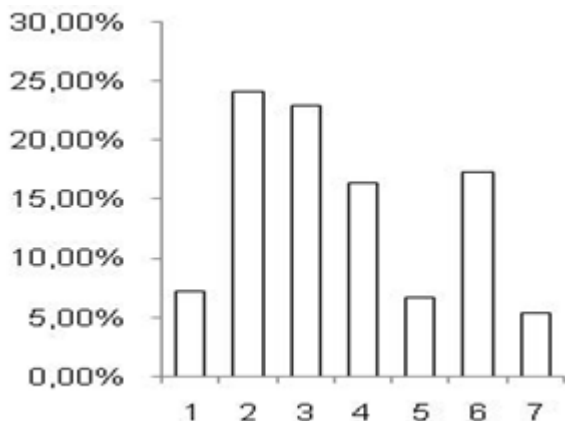
**Figura 3:** Sensibilidad del costo del etanol sobre el precio de la enzima.

El análisis hecho respecto al costo del bagazo considerando su costo de producción y su potencialidad energética, demuestra que con el mejor precio mostrado seguido de mejoras en el precio de la enzima es posible alcanzar un costo competitivo del etanol. Este resultado es mostrado en la figura 4



**Figura 4:** Sensibilidad del costo del etanol sobre el precio del bagazo.

Se hizo un análisis de los costos fijos de inversión debido a que presenta un apreciable impacto en el costo de producción [5]. Del costo de adquisición del equipamiento un 94.66 % se concentra en seis elementos. La figura 5 muestra la composición del costo en las condiciones originales del diseño y la estrategia de operación para la variante 8



1. Equipamiento de evaporación de las pentosas;
2. Equipamiento de hidrólisis enzimática; 3. Tanque de sustratos azucarados; 4 Equipamiento de fermentación de las pentosas; 5 Equipamiento de fermentación de la Glucosa; 6. Equipamiento de Destilación; 7. Otros equipos

**Figura 5.** Composición del costo de inversión.

Se pueden llevar a cabo varias alternativas para disminuir el costo fijo de inversión y el costo de producción por hectolitro. Este estudio requiere de más análisis detallados; por otra parte, en el presente trabajo las etapas de fermentación y destilación son consideradas en la forma tradicional. El estudio se dirigió a la evaporación de las pentosas, la hidrólisis enzimática y el tanque de almacenamiento de jarabe. La nueva estrategia operacional y de diseño permite disminuir el costo de adquisición del equipamiento desde \$ 4 196 170 hasta \$ 3 595 178, para una instalación de 560 hL diarios.

### 3.Resultados.

La combinación de todas las posibles mejoras en los aspectos considerados en el presente trabajo, como es el caso de la disminución del costo de adquisición de la enzima y el bagazo con respecto a la materia prima y de los valores de las inversiones, ya que se utiliza la estrategia de una u otra operación o de las inversiones con un ahorro en los gastos de adquisición de los equipos, permitiendo predecir valores de 42.11 \$/HL de etanol en las mejores condiciones tecnológicas.

La combinación de posibilidades de costos en la materia prima (bagazo de caña, enzimas) y alternativas inversionistas en el equipamiento del etanol a partir de un material lignocelulósico permitiendo reducir los costos de producción.

### 4.Conclusiones.

- Es necesario continuar trabajando en el mejoramiento de las etapas mayores consumidoras de agentes químicos para la optimización del proceso de producción de etanol a partir de residuos lignocelulósicos cuando es empleado el pretratamiento organosolv del bagazo.
- Es posible obtener mejores resultados económicos con una adecuada estrategia inversionista y de operación.
- En el proceso de obtención de etanol a partir de bagazo es necesario un profundo estudio de reuso de agua.
- Un aspecto de vital importancia para lograr costos competitivos del etanol lignocelulósico es lograr la disminución de los costos de adquisición de la enzima y del bagazo.

### 5.Agradecimientos.

El presente trabajo es financiado parcialmente por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) dentro del proyecto ref. D./9619/07 y D/016096/08.

### 6. Bibliografía.

- [1]E. González (1991) Aplicación del análisis de procesos en la intensificación de diferentes industrias de Cuba. Tesis de disertación para la obtención del grado científico de Doctor en Ciencias (segundo nivel en Cuba). Universidad Central de Las Villas. Cuba.
- [2]M González (2004) Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular. Tesis de disertación en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD) Universidad Central de Las Villas.
- [3]L. Mesa, E. Ruiz, C. Cara, E. Castro, E. González. 2008. Organosolv pretreatment of sugar cane bagasse. Preliminary study. 16th European Biomass Conference & Biomass. Valencia. Spain.
- [4]X. Pan, C. Arato, N. Gilkes, D. Gregg, W. Mabee, K. Pye, Z. Xiao, X. Zhang, J. Saddler. 2005. Biorefining of softwood using ethanol organosolv pulping: Preliminary evaluation of process stream for manufacture of fuel grade ethanol and co-products. *Biotechnol Bioeng*; 90: 473-81.
- [5]M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-



Hill International Editions. ISBN 0-07-y 66473-0, 1981.

[6]C. E. Wyman, B. E. Dale, R. T. Elander, M. Holtzapple, M. R. Ladisch, Y. Y. Lee. 2005. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Biores Technol* 96(18): 1959-1966.